

И. И. Хафизов

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИЕМЫ С НАЛОЖЕНИЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ПРИ МАЛООТХОДНОМ РАЗДЕЛЕНИИ МАТЕРИАЛОВ

*Ключевые слова:* малоотходное разделение, технологический процесс, электроалмазная обработка.

*В связи с все расширяющейся практикой электрохимической обработки твердых сплавов немаловажную роль приобретает изучение их электрохимического поведения. Управление комбинированным процессом возможно независимым изменением параметров химической и механической составляющей с ограничениями их предельных значений*

*Keywords:* low-waste division, technological process, electrodiamond processing.

*Due to everything extending practice of electrochemical processing of firm alloys the important role is got by studying of their electrochemical behavior. Management of the combined process of probably independent change of parameters of a chemical and mechanical component with restrictions of their limiting values.*

### Комбинированные методы обработки

#### Электро-абразивная обработка

Электрохимический метод первоначально был разработан для шлифования инструментов из карбида вольфрама [1]. Новый процесс показал явные преимущества по сравнению с дорогим обычным шлифованием. Успехи, достигнутые в настоящее время, позволяют экономично использовать электролитический метод для обработки деталей из закаленной стали. Использование абразивных кругов на угольной связке также будет вкладом в дальнейшем развитии электролитического шлифования.

При разработке труднообрабатываемых материалов электрохимический метод следует сравнивать с электроискровой обработкой. Там, где можно использовать инструменты большой площади и подвести необходимый к ним ток, электрохимическая работа гораздо производительнее электроискровой. Но если по какой-либо причине можно использовать только инструменты с малой площадью, искровая обработка будет, возможно, более экономичной, так как стоимость оборудования для неё составляет примерно только половину стоимости оборудования для электрохимической обработки. Конструкции инструмента для искровой обработки проще, но при электрохимической обработки инструмент не изнашивается. Более того, электрохимическая обработка не повреждает обрабатываемую поверхность, обеспечивает высокий класс чистоты и, кроме того, самый высокий класс чистоты поверхности получается в том случае, когда плотность тока и, следовательно, местная скорость съема металла максимальны. Это означает, что самый высокий класс чистоты поверхности получается тогда, когда обработка ведется на предельной скорости подачи.

Комбинированные методы обработки направлены на интенсификацию процесса анодного растворения [2]. Скорость съема металла и точность формообразования при ЭХО зависят от того, насколько быстро будет идти реакция перехода материала заготовки в шлам. Скорость анодного растворения ограничивается наличием пленки, пассивирующей поверхность, и толщиной диффузионного слоя, которые преодолевают удаляемые продукты обработки.

При электроабразивном шлифовании твердые частицы (абразивные зерна или наполнитель) устраняют пленку, активируя тем самым процесс ЭХО. Размеры абразивных зерен, определяющие межэлектродный зазор, как правило, не превышают десятых долей миллиметра. При таких малых зазорах плотность тока будет значительно больше, чем в случае размерной электрохимической обработки. Резко возрастает скорость съема металла в зоне действия абразивных зерен инструмента. Кроме того, часть припуска удаляется механическим шлифованием. В отличие от обычного шлифования при анодно-абразивной обработке на поверхности заготовки не образуется более прочный наклепанный слой, а производительность шлифования повышается. Следовательно, интенсивность съема металла при анодном растворении возрастает вследствие механического удаления пассивирующей пленки и ускорения процесса выноса продуктов обработки из промежутка, а электрохимическое растворение части металла, в свою очередь, способствует повышению скорости механического шлифования. Кроме указанных составляющих съема при малых зазорах может иметь место электроэрозионный процесс. Таким образом, при малых размерах зазора часть металла заготовки удаляется за счет электрической эрозии.

Скорость съема  $Q$  металла с заготовки может быть представлена в виде следующей суммы:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3,$$

где  $Q_1$  — скорость анодного растворения металла за счет ионного тока;  $Q_2$  — скорость механического удаления припуска абразивными зернами;  $Q_3$  — скорость электроэрозионного съема металла.

Соотношение между составляющими общего съема может изменяться в широких пределах. Если зерна только касаются заготовки, то припуск в основном удаляется анодным растворением. Механический и электроэрозионный съем практически отсутствуют. При значительном усилии на инструмент выступающие части зерен могут углубляться в заготовку. В этом случае между металлическим инструментом и заготовкой на каком-то участке образуется контакт. Заготовка с инструментом могут

контактировать посредством частиц стружки. Режим обработки может быть таким, что сочетание всех составляющих дает возможность получить наиболее высокую скорость удаления припуска и обеспечить заданное качество поверхности. Этот режим устанавливают обычно по результатам экспериментов и поддерживают его, сохраняя параметры процесса, в частности усилие прижима инструмента к заготовке.

Если используется схема обработки с электро-нейтральным инструментом, то скорость съема определяется двумя составляющими. Электрическая эрозия здесь не возникает. Однако и в этом случае сказывается эффект взаимного положительного влияния шлифования и анодного растворения, в результате которого суммарная скорость съема металла значительно превышает сумму отдельных составляющих, взятых без учета такого влияния.

При подаче в зону обработки свободного абразива процесс протекает так же, как при закреплённом зерне. Однако здесь сложно поддерживать постоянную концентрацию зерен в межэлектродном пространстве и съём материала за счёт механического шлифования нестабилен. Это влияет на составляющую  $Q_2$  и процесс становится трудно управляемым. Чтобы избежать коротких замыканий, вызывающих прижоги поверхности, обработку свободным абразивом обычно ведут при пониженных напряжениях ( $U < 10$  В).

В случае подачи наполнителя струей электролита расстояние от сопла до обрабатываемой поверхности может достигать десятков миллиметров, поэтому напряжение на электродах повышают до  $U = 60 \dots 80$  В. Ускорение съема припуска с заготовки происходит за счёт удаления пассивирующей пленки и интенсификации анодного растворения. При использовании металлических наполнителей достаточно больших размеров удается повысить электропроводность электролита, что также способствует ускорению съема металла [5].

#### Электро-абразивное полирование

При электро-абразивном полировании припуск удаляется либо анодным растворением металла и съёмом абразивным зерном, либо только растворением. В первом случае инструмент содержит связанный или свободный абразивный порошок, во втором — в качестве инструмента используют деревянные или пластмассовые бруски, расположенные между металлическими электродами-инструментами.

Области применения процессов с наложением электрического поля

Сравнивая технологические показатели различных способов, можно определить возможности наиболее эффективного их использования в машиностроении.

Электроэрозионная обработка в электроискровом режиме происходит при относительно малой энергии импульсов. Объём металла, удаленный за каждый импульс, невелик, а глубина лунки незначительна. Такой режим позволяет получить поверхности с высокой точностью и малой шероховатостью при невысокой производительности. Кроме того, процесс весьма энергоёмок. Энергоёмкость оценивают отношением расхода электрической энергии к массе удаленного с заго-

товки металла. Энергоёмкость при обработке на электроискровом режиме на порядок выше по сравнению с механической обработкой на аналогичных операциях. Велик также износ профильного инструмента. С учётом сказанного обработка в электроискровом режиме эффективна для изготовления прецизионных деталей небольших габаритов. Эффективность еще более повышается, если материал детали трудно поддается традиционными методами механической обработки или если обрабатываемая поверхность имеет сложную форму. Такие детали характерны для приборостроения, точного машиностроения, инструментального производства.

Обработка в электроимпульсном режиме характеризуется большей энергией разряда - высота неровностей здесь больше. Но за счёт повышения энергии разряда достигается высокая производительность процесса, которая в 15 ... 20 раз превышает аналогичный показатель при электроискровом режиме и составляет для стали до 250 мм<sup>3</sup>/с, для твердых сплавов - 3 ... 5 мм<sup>3</sup>/с. Учитывая малый износ электрода-инструмента и удовлетворительную энергоёмкость, не превышающую аналогичного показателя для фрезерования, обработку на электроимпульсном режиме можно рекомендовать для замены фрезерования крупных полостей сложной формы, углублений, каналов, где механической обработкой не удастся достичь высокой производительности или где затруднен доступ инструмента в зону резания. Такие изделия применяются во многих отраслях индустрии, в частности в энергетическом и транспортном машиностроении, в двигателестроении, радиотехнической промышленности [9].

#### Электроконтактное разрезание

Электроконтактное разрезание в жидкости позволяет получить производительность процесса до 400 ... 450 мм<sup>3</sup>/с, что значительно выше, чем при механическом разрезании заготовок. Однако чистота поверхности и точность обработки здесь невысоки. Способ экономичен - расход электроэнергии в 6 ... 10 раз ниже, чем при обработке на электроискровом режиме. Значителен износ электрода-инструмента и неудобна в эксплуатации рабочая жидкость, которая разбрызгивается. Это вызывает загрязнения станков, деталей, одежды работающих и требует особых конструкций накладных ванн.

Электроконтактное разрезание в жидкости используется в качестве заготовительной операции при получении заготовок из труднообрабатываемых токопроводящих материалов.

Разрезание профильным электродом-инструментом в электроискровом режиме позволяет выполнять:

- пазы и щели малой ширины, например в цапгах;
  - профильные электроды-инструменты для профилирования;
  - разрезание заготовок из вольфрама и других материалов.
- Разрезанием непрофилированным электродом-инструментом получают:
- узкие сквозные или глухие щели;

- вырубные штампы небольших габаритов из твердых сплавов и закаленных сталей;
- рабочую часть резцов и других инструментов;
- щели в цангах для закрепления деталей малого диаметра (менее 2 ... 3 мм);
- таблетки из магнитных, вольфрамовых сплавов, при обработке которых требуется достичь минимального расхода материала;
- надписи, знаки, гравюры.

Электроконтактное разрезание диском или лентой в жидкости используется:

- для получения заготовок из труднообрабатываемых материалов (нержавеющих, жаропрочных, титановых, магнитных и других сплавов);
- для разрезания труб из конструкционных материалов;
- для прорезания узких пазов и отверстий в деталях.

Разрезание в воздушной среде находит широкое использование в металлургической промышленности для:

- разделения на части проката;
- отрезания литников с крупных литых заготовок [4].

Для более полного использования преимуществ ЭХО необходимо проектировать детали с учетом особенностей процесса анодного растворения сплавов. Следует учитывать, что при ЭХО нет разделения на черновые и чистовые операции - при любом режиме ЭХО высота неровностей соответствует чистовым операциям механической обработки, и с возрастанием скорости съема металла шероховатость поверхности снижается. В отличие от механической обработки технологические показатели ЭХО даже повышаются с увеличением твердости материала заготовки. Кроме того, при ЭХО инструмент либо вообще не изнашивается, либо изнашивается незначительно (при комбинированном способе обработки).

При использовании ЭХО необходимо удовлетворить следующим требованиям, общим для всех видов заготовок и схем обработки.

1. Поверхность перед ЭХО должна быть очищена от окалины и других неэлектропроводных веществ.

2. В местах, где удаление металла планируют выполнять с применением ЭХО, не допускается местная зачистка поверхности, например, для контроля твердости.

3. ЭХО необходимо проводить после термической обработки заготовок. Это позволяет избежать нарушения точности за счет коробления при термообработке, предотвращает появление обезуглероженного слоя в готовой детали.

4. При проектировании заготовок припуск не должен быть меньше некоторого предельного значения, определяемого с учетом возможного растворения на обрабатываемых и соседних поверхностях, где металл может растворяться за счет токов рассеяния и ускоренного съема на кромках детали.

5. В технологическом процессе не предусматривают операции и переходы по удалению заусенцев и скруглению кромок на поверхностях после ЭХО.

## Технологические приемы

Существуют специфические требования к технологичности для каждой схемы обработки.

При схеме с неподвижными электродами съем металла интенсивно протекает не только в зоне обработки, но и на большом удалении от нее. Например, при удалении заусенцев с зубчатых колес профиль зуба со стороны торца утоняется на 0,01 ... 0,03 мм. Это не влияет на точность зацепления [3].

При изготовлении посредством ЭХО больших сквозных отверстий их целесообразно прошивать тонкостенным трубчатым электродом-инструментом (схема трепанации). Сердцевина детали остается целой, сокращаются энергоемкость и трудоемкость операции.

При схеме разрезания на конце заготовки должен быть участок с малой шероховатостью ( $R_z = 10 \dots 20$  мкм) для подвода напряжения. Если контакт заготовки с токопроводом не плотный, то возможны прижоги поверхности, нестабильный процесс разрезания.

При обработке по схеме шлифования следует предусмотреть свободный выход круга за шлифуемую поверхность. Если при чистовой обработке, например зуба или шлицевого профиля, невозможен выход инструмента за торцовую поверхность, то приходится останавливать продольную подачу круга при положении его внутри впадины зуба. При этом за счет анодного растворения происходит дополнительный съем металла, что вносит дополнительные погрешности.

Размерная электрохимическая обработка значительно расширяет технологические возможности изготовления деталей. Благодаря ей можно получать формы поверхностей, создание которых другими способами или невозможно, или невыгодно.

По схеме разрезания можно получить с высокой точностью ажурные детали без деформации и заусенцев. Электрод-инструмент выполнен в виде тонкого диска. Анодное растворение происходит без заметного усилия на заготовку, поэтому она не деформируется, заготовка может иметь вращательное движение, что ускоряет процесс отрезания. Скорость углубления инструмента может достигать 0,2 ... 0,3 мм/с, погрешность обработки находится в пределах 0,1 мм. При этом достигается скругление кромки с радиусом до 0,5 мм. При использовании непрофилированного электрода проволоки удается получить пазы сложной формы; прямолинейные участки сопряжены - как радиусами  $R_1, R_2, R_3, R_4$ , так и практически без радиуса ( $R=0$ ). Скорость разрезания может достигать 0,2 мм/с, ширина паза 0,5 ... 5 мм, глубина 0,1 ... 20 мм, погрешность по ширине - до 0,1 мм [8].

## Технологические процессы

Порядок проектирования техпроцесса электроэрозионной обработки

1. По форме обрабатываемой поверхности, ее размерам и требованиям к шероховатости намечают один или несколько способов обработки, позволяющих обеспечить соответствие детали чертежу и техническим условиям; подбирают схему обра-

ботки; рассматривают возможность и целесообразность использования многоконтурной и многоэлектродной обработки.

2. Намечают маршрут технологического процесса электроэрозионной обработки, для чего определяют последовательность и число операций, выполняемых на станке, и контрольных операций.

3. Рассчитывают технологические показатели процесса для каждой операции: производительность, точность, качество поверхности и режимы обработки.

Для эрозионной составляющей расчет режимов выполняют в зависимости от технологических требований к детали: а) при необходимости исключить последующую операцию находят параметры режима, обеспечивающие заданную точность и качество поверхности; б) если деталь должна работать в условиях динамических нагрузок, надо выбирать режимы, при которых отсутствуют микротрещины; в) для достижения минимальной трудоемкости за основу выбора режима принимают максимальную производительность процесса; г) для получения минимальной трудоемкости доводки выбирают режим, при котором затраты на электроэрозионную обработку и последующую доводку будут минимальны. Режимы рассчитывают в такой последовательности: а) выбирают технологический критерий, который должен быть достигнут в конце операции (точность, шероховатость, производительность и т.д.); б) для выбранного критерия по одной из формул и номограммам, прилагаемым к оборудованию, находят энергию импульса в) по характеру операции (черновая, чистовая) находят напряжение холостого хода среднее напряжение. Выбирают требуемую диэлектрическую среду (вода, нефтепродукты и др.); г) определяют длительность импульса; д) находят средний ток, ток короткого замыкания; е) для известной энергии импульса и его длительности находят технологические показатели процесса, не являющиеся критериями[6].

Рассчитанные показатели точности, шероховатости и состояния поверхностного слоя сравнивают с требованиями чертежа и технических условий. Если хотя бы один из показателей оказывается ниже требований чертежа, необходимо наметить последующие операции, используя для этой цели другие методы обработки (электрохимический, механический и т. д.).

4. Из расчета производительности процесса находят скорость подачи электрода-инструмента. Если площадь обрабатываемой поверхности переменная, то определяют закон движения электрода-инструмента. Устанавливают среднюю скорость подачи

5. Находят основное время обработки детали на станке

6. По нормативам находят остальные составляющие штучнокалькуляционного времени: вспомогательное время, время обслуживания, время отдыха, подготовительно-заключительное время

7. Если намечаются дополнительные операции, для доведения технологических показателей до требований чертежа детали необходимо рассчитать их трудоемкость и найти общие затраты времени на выполнение электроэрозионной и последующих операций.

8. Сравнивают общие затраты времени на

электроэрозионную и ранее применявшуюся на этой операции обработку. Если проектируют процесс производства нового изделия, то для сравнения берут технологию механической обработки, позволяющую получить требуемую деталь. Из исходных данных берут программу выпуска деталей, подбирают серийный станок, обеспечивающий изготовление заданной детали, и проводят предварительное технико-экономическое обоснование целесообразности использования электроэрозионной обработки.

Электроэрозионный и комбинированные методы позволяют обрабатывать поверхности, которые не могут быть обработаны традиционными методами. К ним относятся криволинейные глухие и сквозные отверстия переменного сечения, узкие сквозные и глухие пазы, соединительные каналы между углублениями. В подобных случаях нет необходимости в технико-экономическом обосновании.

9. При положительных результатах расчета по п. 8 разрабатывают операционные карты технологического процесса в количестве, определяемом маршрутной картой.

10. Намечают схему базирования, установки и закрепления заготовки, обосновывают целесообразность проектирования специальных приспособлений для установки заготовки и инструмента.

11. Выбирают из числа имеющегося или в противном случае проектируют и изготавливают инструмент. При обработке непрофилированным электродом-инструментом выбирают материал, диаметр, скорость перемещения проволоки или стержня, натяжение проволоки и рассчитывают траекторию движения электрода-инструмента.

12. Разрабатывают технические задания на проектирование специальных приспособлений. При этом учитывают условия установки деталей в приспособлении, необходимость изоляции, защиту подвижных элементов от попадания продуктов обработки, вызывающих абразивный износ.

13. После изготовления всей оснастки и инструмента производят настройку станка и изготовление первой детали.

14. Уточняют режимы обработки в операционных картах, конструкцию инструмента и приспособлений.

15. Проводят уточненный расчет технико-экономических показателей от внедрения электроэрозионного процесса.

### Особенности проектирования технологического процесса ЭХО

После изучения чертежей заготовки, детали, технологических возможностей ЭХО проектируют технологический процесс:

1. Выбирают схему ЭХО, учитывая форму обрабатываемой поверхности, исходя из наличия оборудования и инструмента.

2. Оценивают технологичность детали и вносят необходимые изменения в чертежи с учетом применения ЭХО.

3. Оценивают технологические показатели ЭХО и сравнивают их с аналогичными показателя-

ми механической обработки.

4. Обосновывают целесообразность применения ЭХО. Если деталь нельзя изготовить другим способом, такого обоснования не требуется.

В серийном производстве ЭХО целесообразно применять при обработке заготовки сложной формы из высокопрочных сплавов или материалов с повышенной хрупкостью, вязкостью (жаропрочные, титановые и другие сплавы). Детали из конструкционных материалов изготавливают, используя ЭХО, если затруднен доступ инструмента в зону резания, или другие способы вызывают деформацию, например обработка труб и отверстий некруглой формы при отношении длины к диаметру более 10.

Следует учитывать также, что процесс ЭХО легко поддается автоматизации и его можно применять для изготовления деталей из токсичных, огнеопасных материалов, например бериллия, магния.

5. Сравнивают полученные расчетным путем показатели точности, качества поверхности с требованиями чертежа детали. Если возможности ЭХО не удовлетворяют этим требованиям, то предусматривают доводочные операции.

6. Определяют минимальный припуск на обработку и уточняют чертеж заготовки.

7. Разрабатывают маршрутный процесс ЭХО и уточняют его место в общем технологическом процессе изготовления детали.

8. Намечают способы защиты необрабатываемых поверхностей от анодного растворения: создание повышенных межэлектродных зазоров, использование диэлектрических покрытий.

Применяемые методы разделения металлов позволяют, в основном, выполнять заготовительные операции, где не требуется высокая точность и качество поверхностного слоя, которые обеспечиваются на последующих этапах обработки, требующих значительных припусков на процесс, имеющих высокую трудоемкость и удельную энергоемкость

## Литература

1. Электрофизические и электрохимические методы, обработки материалов/ Б.А. Артамонов, Ю.С. Волков, В.И. Дрожалова и др. Т.1,2 Обработка материалов с применением инструмента/ Под ред. В.П. Смоленцева. - М.: Высш шк., 1983., 320 с.
2. Хафизов И.И. Интенсификация комбинированного процесса электроалмазной обработки металлов и сплавов и повышение качества обрабатываемости поверхности металлов// Технологическое обеспечение качества машин и приборов: сборник статей III Международной научно-практической конференции. Пенза: 2006- С. 64-66.
3. Хафизов И.И. Садыков З.Б. Закирова А.Р. Разработка новых технологических режимов комбинированной обработки различных видов материалов. Современные технологии и материалы – ключевое звено в возрождении отечественного авиастроения: Материалы Международной научно-практической конференции. Т.2. Казань, 10-11 августа 2010 года. – Казань: Изд-во «Вертолет», 2010. – С.228-233.
4. Корягин С.И., Пименов И.В., Худяков В.К. Способы обработки материалов: Учебное пособие/Калининградский гос. ун-т – Калининград, 2000.– 448 с.
5. Хафизов И.И. Автореф. дисс. канд. техн. наук. Изд-во ГОУ ВПО ВГТУ, 2007, 18 с.
6. Смоленцев В.П. Сухоруков Н.В. Физические основы и технологическое применение электроконтактного процесса. Воронеж РИА 1998,148с.
7. Общетехнический справочник. Москва Машиностроение1982, 496с.
8. Виноградова С.С., Межевич Ж.В., Мурашова И.Б., Исакова И.О. Исследование резонансных явлений в процессе гальванодинамического растворения никеля // Вестн. Казан. технол. ун-та – 2012. – №4. – С. 129-132.
9. Кашапов Р.Н. Исследование влияния плазменно-электролитной обработки на поверхность аустенитных хромоникелевых сталей// Вестн. Казан. технол. ун-та – 2011. – №4. – С. 149-155.
10. Де Барр А.Е., Оливер Д.А. Электрохимическая обработка/ М.: Машиностроение. 1973. 183 с.